DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.01.025

滑板运动鞋-板-足有限元模型的建立及有效性验证

吴宇森,王海春,朱晓兰

(北京体育大学运动人体科学学院,100084 北京)

摘 要:探索生物力学实验数据加载到滑板模型的有效途径,计算足部结构的力学响应。使用 CT 与 3D 扫描仪获取足、滑板鞋和滑板数据并建立有限元模型,使用压力平板与压力鞋垫在自然站立状态时验证模型的有效性。所建立模型包括足骨(包括跗骨、跖骨、趾骨以及胫骨腓骨远端)、软组织、滑板鞋面、滑板鞋底、板面、连接桥、轮子以及地面,共 408 043 个节点,260 400 个网格单元,网格质量为 0.79。足底压力峰值实测为 80 kPa,仿真所得为 82.2 kPa,误差为 2.75%。实测板底后轮处最大压力为 2.314 MPa,前轮处最大压力为 1.427 MPa,仿真所得后轮处应力峰值为 2.392 MPa,前轮处的应力峰值为 1.479 MPa,误差分别为 3.37% 与 3.64%。本研究构建的滑板鞋-板-足耦合模型具有较好的几何和力学相似性,经验证有效可靠。

关键词:滑板运动;滑板鞋;有限元;多体耦合;生物力学

中图分类号:G804.64 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-4939(2025)01-0236-07

Construction and verification of foot-shoe-board finite element model in skateboard

WU Yusen, WANG Haichun, ZHU Xiaolan

(Sport Science School, Beijing Sport University, 100084 Beijing, China)

Abstract: This study explored an effective way to load biomechanical data into the model, simulate the moment of skateboard, and calculate the mechanical characteristics of foot structures. A male skateboarder was recruited to select a shoe and skateboard. CT and 3D scan were used to obtain the feet of healthy skateboarder, skateboard shoes and skateboard model, and use Ansys 2020 for modeling and calculations. Sensor Medica pressure plate and Pedar pressure insole were used to obtain the mechanical characteristics of the skateboard and foot when the subjects stood on the skateboard to verify the model. The model consisted of foot bones (including tarsal, metatarsal, phalangeal, and distal tibial fibula), soft tissue, skateboard shoes upper and outsole, board, bridges, wheels and ground. There were 408 043 nodes and 260 400 mesh cells, and the mesh element quality was 0.79. The measured peak foot pressure was 80 kPa, and the calculated peak foot stress was 82.2 kPa, with an error percentage of 2.75%. The measured peak pressure of the skateboard plate is 2.314 MPa at the rear wheel, the front wheel is 1.427 MPa, the simulated stress

收稿日期:2023-07-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.72071018)
通信作者:朱晓兰,副教授。E-mail:zhuxiaolan@bsu.edu.cn
引用格式:吴宇森,王海春,朱晓兰. 滑板运动鞋-板-足有限元模型的建立及有效性验证[J]. 应用力学学报,2025,42(1):236-242.
WU Yusen, WANG Haichun, ZHU Xiaolan. Construction and verification of foot-shoe-board finite element model in skateboard[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(1):236-242.

peak at the rear wheel is 2.392 MPa, the front wheel is 1.479 MPa, the error percentage is 3.37% and 3.64%. The constructed skateboard shoe-board-foot model has good geometric and mechanical similarity, proving it is effective and reliable.

Key words: skateboarding; skateboard shoe; finite element; multibody coupling; biomechanics

滑板运动是在不同地形、地面及特定设施上完成各种复杂的滑行、跳跃、旋转、翻腾等高难度动作的技巧型板类运动项目[1]。豚跳(ollie)作为滑板运动的基础动作,是国内外研究的主要技术动作[2-3],包括准备、起跳上升、下落和着地缓冲 4 个阶段。滑手需要在运动状态下的滑板板面上完成上述 4 个动作,人体足部与滑板鞋、滑板鞋与滑板板面以及滑板与地面之间,分别受到摩擦力、重力与反作用力的作用[4-5]。有数据表明,滑板运动员从 22.9 cm 高度落到滑板,足踝部在着地瞬间受力为 4.61 倍人体自身体重[6],下肢损伤在滑板运动中较为常见[7]。

运动鞋作为必要的运动装备,在人体运动,尤其是极限运动中起到非常重要的支撑稳固、缓冲震荡和吸收能量的作用[8-9]。科学的运动鞋结构可以影响下肢髋、膝、踝关节参数[10],不同的中底厚度和硬度可以影响踝关节稳定性和缓冲时间[11],具有缓震功能的鞋垫可以提高压力疼痛的阈值,降低足部损伤风险[12]。有限元法广泛应用在跑鞋[13]、冰球鞋[14]、羽毛球鞋[15]、高跟鞋[16]等领域的研究。建立人体足部-运动鞋计算机模型,仿真模拟并计算得到站立[17]、行走[18]、跑步[13]等运动状态下人体各结构的力学数据,通过对中底与鞋垫材料、鞋跟高度、足弓支撑倾斜角度等参数的变化进行优化设计[19],提升鞋类产品的功能性。

目前,对于滑板运动和滑板装备的研究主要集中在人体运动学参数分析与研究方法的探索等方面。本研究拟建立符合中国人体结构特征的滑板鞋-板-足有限元耦合模型,将运动生物力学实验数据加载到计算机模型中,实现对滑板运动各特征时刻动作的模拟。以人体足部结构力学响应作为仿真计算指标和评测指标,将滑板运动与滑板鞋性能研究紧密结合在一起,为后续开展滑板动作技术分析、人体足部运动损伤预警以及滑板鞋设计研发等提供数据支持。

1　材料与方法

1.1　研究对象

模型基于 1 名男性大学生(年龄 24 岁,身高 178 cm,体质量 71 kg,鞋码为 42,无足部或下肢损伤,具有两年以上的滑板运动经历),在测试前签署《知情同意书》。扫描用板是一款 8.0 寸标准街式滑板,板面为 Deathwish(美国),桥为 theeve 的钛合金 TIAX 系列,轮子为 Bones STF 99A V1。扫描用鞋是一款 ES'(美国)滑板鞋,鞋底为橡胶,鞋面为翻毛皮材料,鞋码为 42.5。该研究方案已通过北京体育大学运动科学实验伦理委员会的审批(编号为 2023143H,日期为 2023 年 4 月 28 日)。

1.2　有限元模型的建立与耦合

使用计算机断层扫描仪(西门子 go. top 64 排 128 层螺旋 CT 机,德国)获取受试者穿鞋时右脚的影像数据,扫描层厚 1 mm。使用三维激光扫描仪(Creaform 公司,加拿大)获取滑板、桥、轮子的三维数据,扫描分辨率为 0.7 mm。在 Mimics 21.0(Materialise 公司,比利时)中对足-滑板鞋模型进行重建,使用图像分割技术提取骨骼、软组织与滑板鞋的优化蒙版,骨骼根据阈值 226 ~ 2 657 划分,软组织根据阈值 −700 ~ 225 划分,鞋模型根据全覆盖阈值蒙版减去骨骼与软组织蒙版获得。为便于网格划分以及提高计算效率,对足部所有骨骼与关节进行了融合简化操作[20]。对骨骼、软组织、鞋进行重建与平滑。在 Geomagic Studio 2013 (Raindrop Geomagic 公司,美国)中完成滑板板面及轮子模型的重建,主要包括点云处理、三角网格面片修补、平滑与清除不必要的特征,最后拟合 NURBS 曲面生成实体模型。在 ANSYS 2020R2(ANSYS 公司,美国)软件中完成足部骨骼、足部软组织、鞋、滑板、轮子等结构的耦合与接触设置。使用 Slice 功能对滑板鞋进行切割将其划分为鞋面与鞋底,通过赋予鞋底和鞋面不同的材料进行仿真计算。考虑到滑板鞋包裹性较好的问题,运用布尔运算填充足部软组织与滑板鞋空隙,作为鞋帮内衬[21]。

1.3　网格划分与接触设置

利用 ANSYS 2020R2(ANSYS 公司,美国)软件

的网格划分功能,将鞋-板-足模型的单元类型定义为 Solid 187 实体结构单元[22],采用自动划分与人工控制网格大小与质量相结合的方法,对模型使用四面体单元网格划分(表 1)。模型中所有接触均为“面-面”接触,其中软组织、内衬、鞋面、鞋底与板面之间设定为摩擦接触,摩擦系数为 0.6[23],其余零部件间的接触均设定为绑定接触[14],得到的模型如图 1 所示。

表 1 有限元模型各部分网格划分情况

Tab. 1 The mesh of the finite element model

名称	单元类型	单元尺寸/mm	节点数量	单元数量
骨骼	SOLID187	4	55 827	35 882
软组织	SOLID187	4	139 288	91 616
板面	SOLID187	10	52 843	29 643
桥、轮子	SOLID187	7	26 521	24 262
鞋底	SOLID187	7	13 433	7 117
鞋面	SOLID187	7	17 319	8 477
内衬	SOLID187	5	77 183	49 051
地面	SOLID187	10	25 629	14 352

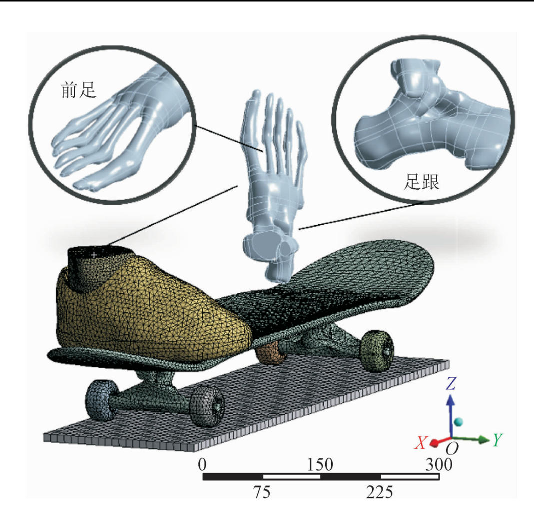


图 1 有限元模型网格划分结果图(单位:mm)

Fig. 1 Meshing results of the finite element model (unit:mm)

1.4 定义模型材料参数

足、鞋和板各结构的材料属性参数(表 2)均参考相关文献[14,20,24-28]。考虑到模型的复杂性和模拟的收敛性能,设定足部各组织为各向同性、理想均质的线弹性材料[29-30]。足部骨骼与软组织材料参考文献[20,28]设置,滑板结构中板面为云杉木[27],桥与轮子为结构钢材料。

表 2 有限元各部分材料属性清单

Tab. 2 Material properties of the finite element model

名称	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比
骨骼	1 500	7 300	0.30
软组织	937	1.15	0.49
板面	2 000	11 000	0.48
桥、轮子	7 850	200 000	0.30
鞋底	2 300	8	0.47
鞋面	998	10	0.42
内衬	613	13.25	0.45
支撑面	5 000	17 000	0.10

1.5 模型载荷与边界条件

本研究选择 ANSYS Workbench 软件中静态结构力学来模拟受试者右足穿滑板鞋在滑板上自然平衡站立。双足静止站立时每只足大约承受体重一半的力[31],本实验模拟地面反作用力为受试者体重的一半,即 355 N。平衡站立时小腿肌肉中仅小腿三头肌有明显肌电活动[32],本次模拟仅考虑跟腱力对足部骨骼的作用,忽略其他肌肉力[33]。站立时跟腱力大约为足部承受载荷的 50%[34],本实验模拟跟腱力为 177.5 N。

模型加载与边界条件:在足跟处施加垂直向上的跟腱力(177.5 N)。由于实际测量在站立过程中人-滑板-地面系统所发生的垂直向下的位移数据较为困难,本研究通过固定胫腓骨上表面,在地板添加向上的位移,模拟站立状态下的整体系统的位移情况。采用重复调整地面向上位移量的方法来探索系统的整体位移情况,最终选择在地板上添加 1.4 mm 的垂直向上的位移,同时约束地面支撑板在大地坐标系中 x 和 y 轴方向的位移,模拟受试者在滑板上静止站立状态(图 2)。

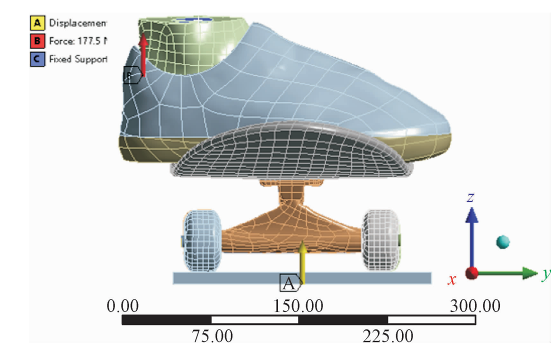


图 2 有限元模型边界与加载条件示意图(单位:mm)

Fig. 2 Boundary and loading conditions of the finite element model (unit:mm)

1.6　滑板鞋-板-足有限元模型的验证

在本研究中,通过对比自然站立状态下仿真计算与实际测试得到的足底、板底压力数据,验证耦合模型的有效性(图 3)。应用 ANSYS Workbench 2020R2 软件计算获得自然站立状态下足底、板底的压力分布云图。使用 Sensor Medica 足底压力步态分析系统(Sensor Medica,意大利)获取受试者穿着滑板鞋自然静止站立在滑板上的板底压力数据,采样频率为 100 Hz,使用 Pedar 压力感应鞋垫测试系统(Pedar-X;Novel,Inc. ,德国)同步采集足底压力峰值及分布数据,采样频率为 50 Hz。

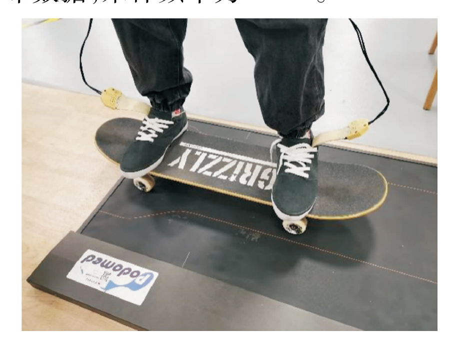


图 3　足底与板底压力测试示意图

Fig. 3　Foot and skateboard pressure test

2　研究结果

2.1　鞋-板-足有限元模型建立结果

研究采用了一名具有滑板运动经历的男性大学生健康足部 CT 扫描数据、滑板三维扫描数据及有限元建模软件成功建立了滑板鞋-板-足有限元模型,包括足骨(含跗骨、跖骨、趾骨以及胫骨腓骨远端)、足部软组织、滑板鞋面、滑板鞋底、板面、连接桥、轮子以及地面支撑板。该模型完全依据建模对象的实际形态进行耦合,共 408 043 个节点,260 400 个网格单元,网格质量[35]为 0.79。

2.2　足底压力数据及验证

实际测量受试者穿着滑板鞋双足站立在滑板上保持静止时的足底压力分布情况(图 4 左),足底压力峰值为 80 kPa,主要位于第一趾骨处。模拟计算所得同等条件下的足底应力分布情况(图 4 右),足底应力峰值为 82.2 kPa,与实测值相比误差为 2.75%。

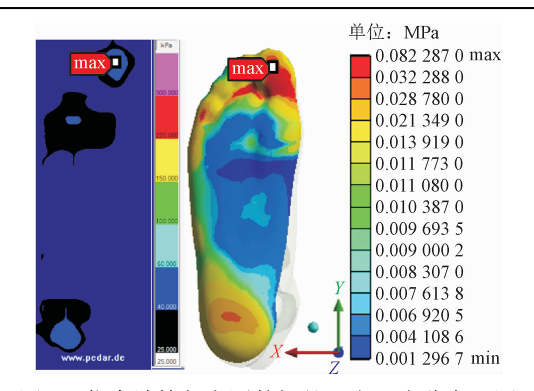


图 4　仿真计算与实测数据的足底压力分布云图

Fig. 4　Simulation results and measured data for plantar pressure distribution cloud maps

2.3　板底压力数据及验证

实验测得板底压力分布主要位于后轮处(图 5 左),后轮处压力峰值为 2.314 MPa,前轮处压力峰值为 1.427 MPa。模拟计算所得板底应力分布主要位于后轮处(图 5 右),后轮处应力峰值为 2.392 MPa,与实测值相比误差为 3.37%,前轮处的应力峰值为 1.479 MPa,与实测值相比误差为 3.64%。

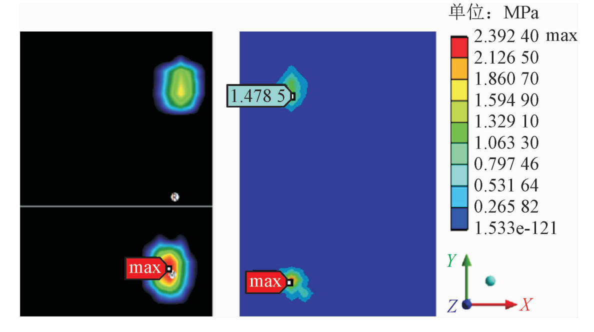


图 5　仿真计算与实测数据的板底压力分布云图

Fig. 5　Simulation results and measured data fo skateboard pressure distribution cloud maps

3　讨论与分析

有限元法作为一种数值模拟方法,可以解决传统生物力学实验法中无法直接测的人体骨骼、韧带等内部结构力学数据的问题[36]。目前使用 MRI (magnetic resonance imaging)、CT (computed tomography)技术和 CAD、Mimics 等软件获取足部模型被认为是一种可靠的三维建模方法[37-38]。虽然建立的有限元模型越趋近于真实状态越好,但考虑到建模的可操作性和计算的效率,研究所建立的模型可以根据研究目的降低复杂程度,进行一定的简化处理。

例如对足部踝关节不稳的研究，简化了足部其他结构，只建立了踝关节相关的关节面、韧带等结构[39]。

模型的有效性对于计算结果至关重要，模型验证常采用对比仿真数据与实测数据的误差[40]，模型误差率小于10%，可视为模型有效[41]。与足部相关的研究一般采用足底压力测试、足部几何形态或尸体实验获取足底压力、地面反作用力、模拟应变等指标[41]。对足部的骨骼、软骨、韧带等复杂结构进行简化处理[20]，对材料属性的不准确定义[17,41]，均有可能产生误差。本研究利用 CT 扫描与三维扫描技术获得了滑板爱好者足、鞋与滑板的扫描数据进行建模，足底和板底的误差率均小于4%，模型有效可靠，可用于下一步研究。

在运动生物力学分析中，使用运动分析系统、三维测力台以及表面肌电仪等设备可获取人体运动过程中关节角度、地面反作用力、肌电等指标数据[19,28,42]。将这些指标与有限元模型相结合，实现对运动场景的高度模拟，计算得到运动过程中人体内部骨骼、关节、韧带等的力学特征[18,43]。通过对人体复杂解剖结构的受力情况进行定量分析[44]，可以更加深入地开展动作技术分析、运动损伤、运动装备等领域的研究[15,24,41,45-46]。例如，将三维拍摄的冰球运动员的蹬冰角度，作为模型的加载条件，分析并预测蹬冰角度对足踝部的损伤风险[14]；或者将实验获得的足球射速和转速等输入有限元模型中，研究足与鞋对足球运动轨迹的影响[20]。

在运动鞋的研究中，建立“足-鞋-使用场景”的计算机模型，可以在专项运动条件下系统地研究人体运动表现问题[41]、运动损伤机制问题[47]、足部结构的生物力学问题、力学传递问题、运动鞋材料和结构设计的功效问题等[48-49]。例如，在研究人体起跳后单脚或者双脚落地动作，传统生物力学方法获得的受试者在运动状态下的膝关节角度、跖趾关节角度、峰值时刻垂直地面反作用力等数据，可以用于分析和评测运动鞋装备对跑步、打球等动作过程中下肢的运动影响。同时，地面反作用力等对足部作用造成损伤风险[24]，则可以通过计算机模型仿真计算出运动过程中的足部各结构的压力分布情况来评测[19]，具体到每一条筋膜、韧带、足趾、关节或软骨[26,50-51]。此外，改变鞋结构[45]或者材料硬度[26]、厚度[42]等参数，通过对比计算仿真获得的人体结构，尤其是足踝部的应力、应变数据，可以进行运动鞋设计的定量评估以及结构优化[18]。

本研究在建模过程中，考虑到足-滑板鞋-滑板复杂的计算环境和计算效率，对模型进行了简化处理，将足部骨骼和关节融合为一体，用来分析足底的压力变化情况，后续可对骨骼、韧带、软骨等结构区别细化，提高模型的还原度。在实际运动过程中，左右足分别承担了不同的动作任务，本研究仅将多数运动员的优势足（右足）作为研究对象，后续可考虑对双足有限元模型进行滑板动作同步分析。未来可将滑板动作的运动学与动力学等特征加载至足-滑板鞋-滑板有限元模型中，开展动态仿真研究，实现滑板技术动作的动态还原，深入分析滑板运动中足内部结构的受力特征，及优化滑板鞋与鞋垫设计。

4 结束语

本研究构建的滑板鞋-板-足耦合模型具有较好的几何和力学相似性，经验证有效可靠，可以为设计滑板鞋和研究滑板运动表现以及预防足部运动损伤等提供研究思路与数据支持。

参考文献：

[1] DICKINSON S, MILLIE A, PETERS E. Street skateboarding and the aesthetic order of public spaces[J]. The British journal of criminology, 2022, 62(6): 1454-1469.

[2] LEUCHANKA A, EWEN J, COOPER B. Bipedal in-shoe kinetics of skateboarding—the ollie[J]. Footwear science, 2017, 9(S1): S122-S124.

[3] VORLÍČEK M, SVOBODA Z, PROCHÁZKOVÁ M. Analysis of muscle activity in various performance levels of ollie jumps in skateboarding: a pilot study[J]. Acta gymnica, 2015, 45(1): 41-44.

[4] NEVITT M, DETERMAN J, FELIX A, et al. Frictional requirements of skateboarding shoes during a push-off[J]. Footwear science, 2009, 1(S1): 34-35.

[5] FREDERICK E C, DETERMAN J J, WHITTLESEY S N, et al. Biomechanics of skateboarding: kinetics of the ollie[J]. Journal of applied biomechanics, 2006, 22(1): 33-40.

[6] NEVITT M, DETERMAN J, COX J, et al. Ground reaction forces in skateboarding: the ollie[EB/OL]. [2022-12-26]. https://www.researchgate.net/publication/237589607.

[7] RODRÍGUEZ-RIVADULLA A, SAAVEDRA-GARCÍA MÁ, ARRIAZA-LOUREDA R. Skateboarding injuries in spain: a web-based survey approach[J]. Orthopaedic journal of sports medicine, 2020, 8(3): 2325967119884907.

[8] 李建设，顾耀东，陆毅琛，等. 运动鞋核心技术的生物力学研究[J]. 体育科学，2009，29(5)：40-49.
LI Jianshe, GU Yaodong, LU Yichen, et al. Biomechanical research

on sports shoe's core technology[J]. China sport science,2009,29(5):40-49(in Chinese).

[9] DETERMAN J, NEVITT M, FREDERICK E C. Measuring the shock attenuation properties of skateboarding shoes[J]. Footwear science,2009,1(S1):126-128.

[10] 张波. 运动过程中鞋内底结构对下肢生物力学的影响探究[J]. 中国皮革,2022,51(11):71-75.
ZHANG Bo. Effect of insole structure on biomechanics of lower limbs during exercise[J]. China leather,2022,51(11):71-75(in Chinese).

[11] 刘浪. 不同中底硬度和厚度的跑鞋对运动时下肢生物力学特征的影响[D]. 北京:首都体育学院,2022.

[12] MADELEINE P, HOEJ B P, FERNÁNDEZ-DE-LAS-PEÑAS C, et al. Pressure pain sensitivity changes after use of shock-absorbing insoles among young soccer players training on artificial turf:a randomized controlled trial[J]. Journal of orthopaedic & sports physical therapy,2014,44(8):587-594.

[13] FIRMINGER C R, FUNG A, LOUNDAGIN L L, et al. Effects of footwear and stride length on metatarsal strains and failure in running[J]. Clinical biomechanics,2017,49:8-15.

[14] 朱晓兰,王海春,刘敬喜,等. 基于有限元模型分析不同蹬冰角度足踝部应力分布差异[J]. 医用生物力学,2022,37(6):1138-1144.
ZHU Xiaolan, WANG Haichun, LIU Jingxi, et al. Analysis on differences in stress distribution of foot and ankle at different push-off angles based on finite element model[J]. Journal of medical biomechanics,2022,37(6):1138-1144(in Chinese).

[15] AB RASHID A M, RAMLEE M H, GAN H S, et al. Effects of badminton insole design on stress distribution, displacement and bone rotation of ankle joint during single-leg landing:a finite element analysis[J]. Sports biomechanics. (2022-06-20)[2022-08-15]. https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2086168.

[16] STOICA M, CRISAN N, CUCU L, et al. Study of customized plastic high heels footwear[J]. Materiale plastice,2022,59(1):243-251.

[17] NOUMAN M, DISSANEEWATE T, CHONG D Y R, et al. Effects of custom-made insole materials on frictional stress and contact pressure in diabetic foot with neuropathy:results from a finite element analysis[J]. Applied sciences,2021,11(8):3412.

[18] YU J, CHEUNG J T M, WONG D W C, et al. Biomechanical simulation of high-heeled shoe donning and walking[J]. Journal of biomechanics,2013,46(12):2067-2074.

[19] PENG Y H, WANG Y, WONG D W C, et al. Different design feature combinations of flatfoot orthosis on plantar fascia strain and plantar pressure:a muscle-driven finite element analysis with Taguchi method[J]. Frontiers in bioengineering and biotechnology,2022,10:853085.

[20] ISHII H, SAKURAI Y, MARUYAMA T. Effect of soccer shoe upper on ball behaviour in curve kicks[J]. Scientific reports,2014,4:6067.

[21] CHO J R, PARK S B, RYU S H, et al. Landing impact analysis of sports shoes using 3-D coupled foot-shoe finite element model[J]. Journal of mechanical science and technology,2009,23(10):2583-2591.

[22] LI S D, ZHANG Y, GU Y D, et al. Stress distribution of metatarsals during forefoot strike versus rearfoot strike:a finite element study[J]. Computers in biology and medicine,2017,91:38-46.

[23] CHEUNG J T M, ZHANG M. A 3-dimensional finite element model of the human foot and ankle for insole design[J]. Archives of physical medicine and rehabilitation,2005,86(2):353-358.

[24] WONG D W C, NIU W X, WANG Y, et al. Finite element analysis of foot and ankle impact injury:risk evaluation of calcaneus and talus fracture[J]. Plos one,2016,11(4):e0154435.

[25] QIU T X, TEO E C, YAN Y B, et al. Finite element modeling of a 3D coupled foot-boot model[J]. Medical engineering & physics,2011,33(10):1228-1233.

[26] ZHU X L, LIU J J, LIU H, et al. Effects of midsole hardness on the mechanical response characteristics of the plantar fascia during running[J]. Bioengineering,2023,10(5):533.

[27] 李荣帆,凌志彬,穆泉蒙,等. 浆锚栓钉连接钢-正交胶合木组合梁抗弯性能有限元分析[J]. 木材科学与技术,2022,36(3):80-89.
LI Rongfan, LING Zhibin, MU Quanmeng, et al. Finite element analysis on flexural behavior ofsteel-cross laminated timber composite beams connected with studs embedded in grout pockets[J]. Chinese journal of wood science and technology,2022,36(3):80-89(in Chinese).

[28] 宋杨,孙冬,岑炫震,等. 个体化足-鞋耦合有限元建模及在跖骨应力研究中的应用[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1204-1212.
SONG Yang, SUN Dong, CEN Xuanzhen, et al. Subject-specific finite element modelling of the foot-shoe complex and its application in metatarsal stress research[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(5):1204-1212(in Chinese).

[29] 刘姣姣. 足-鞋有限元模型的建立及在足底筋膜研究中的应用[D]. 北京:北京体育大学,2019.

[30] 张晴晴. 足部三维复合模型的有限元分析及其应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.

[31] BOCANEGRA M A M, LÓPEZ J B, VIDAL-LESSO A, et al. Numerical assessment of the structural effects of relative sliding between tissues in a finite element model of the foot[J]. Mathematics,2021,9(15):1719.

[32] LIU W, LI F, HE H Y, et al. Biomechanical application of finite elements in the orthopedics of stiff clubfoot[J]. BMC musculoskeletal disorders,2022,23(1):1112.

[33] CHEUNG J T M, ZHANG M. Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method[J]. Medical engineering & physics,2008,30(3):269-277.

[34] SUN D, FEKETE G, BAKER J S, et al. A pilot study of musculoskeletal abnormalities in patients in recovery from a unilateral rupture-repaired Achilles tendon[J]. International journal of environmental research and public health,2020,17(13):4642.

[35] HERTEL J E, SUSTER J R, HAWLEY J R, et al. Finite difference

heat transfer model of a steel-clad aluminum brake rotor[C]//23rd Annual Brake Colloquium and Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2005: 2005-01-3943.

[36] CHEN T L W, WONG D W C, WANG Y, et al. Foot arch deformation and plantar fascia loading during running with rearfoot strike and forefoot strike: a dynamic finite element analysis[J]. Journal of biomechanics, 2019, 83: 260-272.

[37] SONG Y, SHAO E Z, BÍRÓ I, et al. Finite element modelling for footwear design and evaluation: a systematic scoping review[J]. Heliyon, 2022, 8(10): e10940.

[38] CHATZISTERGOS P E, NAEMI R, CHOCKALINGAM N. A method for subject-specific modelling and optimisation of the cushioning properties of insole materials used in diabetic footwear[J]. Medical engineering & physics, 2015, 37(6): 531-538.

[39] MARTA G, QUENTAL C, FOLGADO J, et al. Contact patterns in the ankle joint after lateral ligamentous injury during internal rotation: a computational study[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part h: journal of engineering in medicine, 2021, 235(1): 82-88.

[40] 张明,张德文,余嘉,等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用[J]. 医用生物力学,2007,22(4):339-344.
ZHANG Ming, ZHANG Dewen, YU Jia, et al. Human foot three-dimensional finite element of modeling and its biomechanical applications[J]. Journal of medical biomechanics, 2007, 22(4): 339-344 (in Chinese).

[41] AKRAMI M, QIAN Z H, ZOU Z M, et al. Subject-specific finite element modelling of the human foot complex during walking: sensitivity analysis of material properties, boundary and loading conditions[J]. Biomechanics and modeling in mechanobiology, 2018, 17(2): 559-576.

[42] YANG Z H, CUI C Y, WAN X L, et al. Design feature combinations effects of running shoe on plantar pressure during heel landing: a finite element analysis with Taguchi optimization approach[J]. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 2022, 10: 959842.

[43] 赖燕珠,谢红. 有限元法在下肢肌骨系统生物力学研究中的应用进展[J]. 应用力学学报,2023,40(4):965-972.
LAI Yanzhu, XIE Hong. Advancement of finite element method's application in biomechanics of the musculoskeletal system of lower limbs[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(4): 965-972 (in Chinese).

[44] 国婷婷,谢红. 有限元法在足踝生物力学研究中的应用进展[J]. 医用生物力学,2022,37(4):766-770.
GUO Tingting, XIE Hong. Applications of finite element methods in foot and ankle biomechanics[J]. Journal of medical biomechanics, 2022, 37(4): 766-770 (in Chinese).

[45] DROUGKAS D, KARATSIS E, PAPAGIANNAKI M, et al. Gait-specific optimization of composite footwear midsole systems, facilitated through dynamic finite element modelling[J]. Applied bionics and biomechanics, 2018, 2018(1): 6520314.

[46] 李建设,顾耀东. 有限元法在运动生物力学研究中的应用进展[J]. 体育科学,2006,26(7):60-62.
LI Jianshe, GU Yaodong. Advancement of finite element method in sport biomechanical research[J]. China sport science, 2006, 26(7): 60-62 (in Chinese).

[47] ELLISON M A, FULFORD J, JAVADI A, et al. Do non-rearfoot runners experience greater second metatarsal stresses than rearfoot runners? [J]. Journal of biomechanics, 2021, 126: 110647.

[48] 马瑞雅. 跑鞋中足弯曲刚度对跑步生物力学特征和主观评价的影响[D]. 北京:北京体育大学,2016.

[49] 李吉如. 跑速和运动鞋对足底压力的影响[D]. 长春:东北师范大学,2007.

[50] LI Z D, ZHANG J H, WANG J M, et al. Preliminary study on the mechanisms of ankle injuries under falling and impact conditions based on the THUMS model[J]. Forensic sciences research, 2022, 7(3): 518-527.

[51] KIM H K, MIRJALILI A, DOYLE A, et al. Tibiotalar cartilage stress corresponds to T2 mapping: application to barefoot running in novice and marathon-experienced runners[J]. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, 2019, 22(14): 1153-1161.

(编辑 李坤璐)